Серия 9 Физика Математика Астрономия 1964

Б. И. Стыро

Изотопы рождаются в атмосфере



18

Доктор физико-математических наук
Б. И. СТЫРО

ИЗОТОПЫ РОЖДАЮТСЯ В АТМОСФЕРЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ЗНАНИЕ»
Москва 1964

552
С88

СОДЕРЖАНИЕ

Болеслав Иосифо́вич Стыро
Редактор И. Б. Файнбойм
Художеств. редактор Е. Е. Соколов
Техн. редактор М. Т. Перегудова
Корректор Э. А. Шехтман
Обложка Н. Д. Васильева

Сдано в набор 27/VII 1964 г. Подписано к печати 4/IX 1964 г. Изд. № 96.
Формат бум. 60×90¹/₁₆. Бум. л. 0,75. Печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,40.
А03264. Цена 4 коп. Тираж 45 800 экз. Заказ 2640.
Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

Типография изд-ва «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.

ЯДЕРНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ

В брошюре рассказывается о новой, недавно родившейся области физики — ядерной метеорологии. Она возникла на стыке таких наук, как физика атмосферы, учение о радиоактивности, радиогеология, радиохимия и т. п.

Ядерная метеорология ставит перед собой три основные задачи. Первая — это изучение поведения радиоактивных веществ в атмосфере, их проникновения в атмосферу и удаления из нее. Вторая задача — изучение метеорологических процессов при помощи радиоактивных изотопов, находящихся в атмосфере, и выявление тех процессов или определение численных величин, которые не поддаются изучению другими, нерадиоактивными методами. Наконец, третья задача — изучение последствий воздействия ядерных и термоядерных взрывов на атмосферу, исследование искусственных полярных сияний, радиоволн, колебаний давления и т. п., а также некоторых явлений планетарного масштаба, вызванных деятельностью человека.

Развитие радиоактивных методов исследования позволило расширить наши представления об атмосфере, глубже проникнуть в тайны ее законов. Для решения этих задач можно воспользоваться в равной мере как искусственно внесенными в атмосферу радиоактивными веществами, так и теми, которые возникают при естественных процессах на Земле и за ее пределами.

Человека окружает воздушный океан, в котором повсюду вкраплены радиоактивные вещества. При распаде эти вещества создают ионизирующее излучение. Оно облучает растения, животных и человека. Практически все продукты питания человека — хлеб, овощи, фрукты, мясо, рыба, молоко, питьевая вода — оказываются загрязненными радиоактивными веществами. Из пищи радиоактивные вещества проникают в тело человека: некоторые из них способны накапливаться в отдельных органах, например в костях, создавая источники внутреннего облучения.

Человеческий организм приспособился к облучению естественных радиоактивных источников и не реагирует на их присутствие. Другое дело искусственно внесенные в атмосферу радиоактивные вещества. Они создают дополнительное облучение человека. Но излучение находящихся в атмосфере и на почве радиоактивных веществ сравнительно невелико и не опасно для человека. Облучение же, которое возникает при длительном употреблении пищи, содержащей некоторые изотопы, способные накапливаться в организме, представляет опасность. К таким изотопам относится, например, стронций-90 с периодом полураспада 28 лет. Стронций-90 способен

вытеснять кальций и накапливаться в костях человека. Он локализуется в отдельных участках костной ткани и создает центры облучения, благодаря которым близлежащие ткани будут день ото дня получать значительные дозы радиации. Можно считать почти полностью установленным, что длительное воздействие дополнительных доз радиации на организм человека сокращает срок жизни; человек преждевременно стареет, увличивается опасность заболевания раком, белокровием.

Радиоактивные загрязнения атмосферы могут оказывать большое влияние на жизнь человеческого общества. Отсюда становится очевидным важность и перспективность их всестороннего исследования. Это направление делает практически важными области, рассматриваемые ядерной метеорологией.

РАДИОАКТИВНОСТЬ

В 1895 году Анри Беккерель изучал явления люминесценции, свойственной различным минералам, солям и некоторым другим химическим соединениям. Он хотел выяснить, не возникают ли при люминесценции лучи, подобные рентгеновским, способные проникать через черную, непрозрачную для света бумагу. Беккерель в своем опыте продержал соль урана (люминесцирующую желто-зеленым светом) под яркими лучами солнца и, завернув в черную бумагу, приложил к ней в темноте фотопластинку. После непродолжительной экспозиции лаборант проявил пластинку: на ней был виден четкий след, оставленный солью.

Однажды, подготовив такой же опыт, Беккерель не выставил пластинку с солью на свет, так как день был пасмурным; он спрятал ее в темный шкаф. Через несколько дней, чтобы убедиться, что хранящиеся в шкафу пластинки годны для опытов, Беккерель проявил пластинку. Каково же было его удивление, когда он обнаружил на ней отпечаток соли урана. Здесь не могло быть люминесценции, так как соль урана находилась вместе с пластинкой в темном шкафу. Беккерель понял, что им обнаружено какое-то новое явление. Продолжая опыты, он убедился, что, независимо от каких бы то ни было причин, соль урана (позже было показано, что и сам уран) излучает невидимые лучи, которые действуют на фотопластинку и вызывают ионизацию воздуха.

Явление, открытое Беккерелем, начали исследовать многие физики. Вскоре Мари Склодовской-Кюри и Пьеру Кюри удалось показать, что, кроме урана, существует еще ряд элементов, которым присуще свойство излучать невидимые лучи, действующие на фотопластинку и вызывающие ионизацию воздуха. Ими были выделены совершенно новые, еще неиз-

вестные науке элементы, обладающие гораздо более мощным излучением, чем уран,— полоний и радий. Эти излучающие элементы получили название радиоактивных, а само явление — радиоактивности.

В дальнейшем были открыты и другие радиоактивные элементы. Затем удалось показать, что при радиоактивном излучении элемент превращается в другой, выбрасывая из ядра альфа-частицу или электрон. В результате длительного исследования радиоактивных веществ удалось показать, что в природе существуют три больших радиоактивных семейства — урана-238, тория-232 и урана-235. Каждый из этих элементов, распадаясь, образует цепочку радиоактивных веществ, последовательно превращающихся друг в друга. Конечный продукт распада каждой цепочки — свинец. Оказалось, что это не одинаковый свинец, а его три вида, обладающие одинаковыми химическими свойствами, но отличающиеся друг от друга своими атомными весами. Конечный продукт распада урана-238 — свинец с атомным весом 206, тория-232 — свинец с атомным весом 208 и урана-235 — свинец с атомным весом 207. Такие химически одинаковые вещества, но обладающие разным атомным весом, называются изотопами. Изотопы бывают стабильными и радиоактивными. Свинец имеет 21 изотоп; из них 5 стабильны, а 16 радиоактивны (последние, распадаясь, превращаются в другие элементы).

Итак, в начале нашего столетия в результате открытия явления радиоактивности стало очевидным, что в числе веществ в земной коре наряду с другими имеются радиоактивные изотопы, которые, подчиняясь только времени, распадаются, превращаясь в другие элементы.

В 1934 году супруги Фредерик и Ирен Жолио-Кюри открыли явление искусственной радиоактивности. Они изучали ядерные реакции в алюминии, облучаемом альфа-частицами (ядрами гелия). Совершенно неожиданным оказалось, что после прекращения облучения алюминия α-частицами еще некоторое время вылетают положительные электроны (позитроны). Однако через каждые $3^1/_4$ минуты количество позитронов, вылетающих за одну секунду, уменьшается вдвое. Обнаруженное явление оказалось похожим на радиоактивный распад, с той только разницей, что здесь вылетали позитроны. Но самое замечательное было в том, что этот распад был создан искусственно, путем облучения алюминия потоками α-частиц. В результате описанной ядерной реакции образуется изотоп фосфора и вылетает нейтрон:

$$Al^{27}{}_{13} + He^{4}{}_{2} \rightarrow P^{30}{}_{15} + n^{1}{}_{0}.$$

Образовавшийся атом фосфора радиоактивен; он распадается с излучением позитрона и превращается в кремний $Si_{14}{}^{30}$:

$$P^{30}_{15} \rightarrow Si^{30}_{14} + e^{0}_{1}.$$

Опыты супругов Жолио-Кюри показали, что в лаборатории искусственным путем можно создать радиоактивные вещества. Опыты были продолжены учеными в разных странах. Бомбардировке α-частицами подвергали все без исключения элементы периодической системы, и вскоре было доказано, что искусственным путем можно создать изотопы любого элемента, имеющегося в природе. Оказалось, что все элементы периодической системы имеют по нескольку стабильных и радиоактивных изотопов. В дальнейшем искусственным путем были созданы новые, неизвестные в природе вещества — заурановые элементы: нептуний, плутоний, америций, кюрий и другие. Все они оказались радиоактивными, с относительно небольшим периодом полураспада. Не является исключением и наиболее легкий из известных в природе элементов — водород. Ученые получили его радиоактивный изотоп с массовым числом 3 и назвали его тритием.

В атмосфере присутствует множество быстрых частиц, пронизывающих ее во всех направлениях. Могут ли эти частицы попадать в ядра элементов, составляющих атмосферный воздух, и вызывать ядерные реакции? Могут. Рождающиеся в результате ядерных реакций новые вещества, видимо, надо искать на земной поверхности или в атмосфере. Эти поиски нелегки, но возможны.

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ В АТМОСФЕРЕ

В начале XX века, после того как было открыто явление радиоактивности, начались повсеместные поиски радиоактивных веществ в природе.

В 1901 году И. Эльстер и Х. Гейтель изучали рассеяние электрических зарядов, вызываемое изолированными заряженными телами в воздухе. Им удалось показать, что одной из причин такого рассеяния служит присутствие в атмосфере радиоактивных веществ, которые ионизуют атмосферный воздух.

При распаде радиоактивных элементов в земной коре образуется радиоактивный газ — радон, который, распадаясь, переходит в ряд твердых веществ. Радон из почвы может проникать в атмосферу. Распадаясь, он образует другие вещества (радиоактивных семейств) уже в атмосфере. К ним относятся некоторые изотопы свинца, висмута и полония — дочерние твердые продукты радона. Они обычно положительно заряжены и поэтому «прилипают» к мелким пылинкам и длительное время существуют в состоянии аэрозолей.

В последнее время удалось показать, что радиоактивные

вещества попадают в атмосферу также с пылью, поднимаемой воздушными потоками, при извержении вулканов и при проникновении вещества из космического пространства с метеоритами.

В 1946 году американский ученый В. Ф. Либби на основании теоретических соображений сделал предположение, что при воздействии на вещество воздуха частиц, обладающих высокими энергиями движения и всегда присутствующих в атмосфере, должны возникать новые радиоактивные изотопы. Среди этих изотопов в первую очередь должны быть C^{14} и тритий. Действительно, вскоре эти изотопы были обнаружены в атмосфере.

Тритий впервые был выделен из воды озера. β-излучение трития обладает энергией, настолько малой, что электрон, выброшенный ядром трития при распаде в воздухе, способен пролететь всего лишь несколько миллиметров. Следовательно, задача измерения трития очень трудна. Прежде всего пробу необходимо сильно обогатить, т. е., оставив молекулы воды, содержащие тритий, удалить большое количество обыкновенного водорода и тяжелого водорода дейтерия (H^2). Обогащение воды тритием обычно производят путем электролиза. Если в подкисленной воде установить два платиновых электрода и начать через них пропускать ток, то у катода будет выделяться водород, а у анода — кислород. Если многие десятки литров воды путем электролиза диссоциировать и дове-

Таблица 1

Некоторые радиоактивные изотопы, обнаруженные в воздухе

Радиоактивный изотоп	Период полураспада	Что излучает	В какой элемент превращается
H^3	12·26 лет	электроны	гелий
Be^7	53 дня	γ-лучи	литий
Be^{10}	$2{,}7 \cdot 10^6$ лет	электроны	бор
C^{14}	5568 лет	электроны	азот
Na^{22}	2,6 года	позитроны, γ-лучи	неон
Si^{27}	100 лет	электроны	фосфор, сера
P^{32}	14,3 дня	электроны	сера
P^{33}	25 дней	электроны	сера
S^{35}	87 дней	электроны	хлор
Cl^{36}	$4{,}4 \cdot 10^5$ лет	электроны	аргон
Cl^{39}	55 минут	электроны, γ-лучи	аргон
Ar^{40}	110 минут	электроны, γ-лучи	калий

сти до объема 1—2 кубических сантиметра, то в остатке окажется по крайней мере 90% бывших в пробе атомов трития. Таким образом, концентрация трития возрастет настолько, что ее можно будет измерить. Существуют и другие, более совершенные методы обогащения трития.

Кроме радиоактивного водорода и углерода, в атмосфере найдены и другие радиоактивные изотопы. Некоторые из них представлены в табл. 1.

Период полураспада всех вписанных в указанную таблицу элементов от 55 минут до 2,7 миллиона лет. Это время в геологической шкале времен невелико. Поэтому все эти элементы не могли попасть на Землю в те далекие времена, когда она образовалась, ибо возраст Земли оценивается в 5 миллиардов лет. Если бы эти элементы возникли при образовании Земли, то они не сохранились бы до нашего времени, а давным-давно распались. Но они существуют. Можно уверенно сказать, что изотопы, особенно с периодом полураспада, измеряемым днями или даже минутами, рождаются в наше время. Эти изотопы и обнаруживаются в атмосфере. Как они попали в атмосферу? Существует несколько гипотез. Может быть, эти изотопы возникают на Солнце или в космосе и проникают в нашу атмосферу. Возможно, они попадают в атмосферу с земной поверхности. Наконец, можно предположить, что они рождаются в самой атмосфере.

ГДЕ ВОЗНИКАЮТ КОРОТКОЖИВУЩИЕ ИЗОТОПЫ?

Где, в каком слое и на какой высоте в атмосфере больше всего радиоактивных изотопов типа H^3, C^{14} и других, перечисленных в табл. 1. Если их окажется больше у земной поверхности, чем в высоких слоях атмосферы, то естественно будет предположить, что они рождаются в земной коре и оттуда проникают в атмосферу. Если этих веществ больше в высокой атмосфере, то можно будет заключить, что либо они приходят из космоса, либо рождаются в высоких слоях.

Доказательством атмосферного происхождения трития в водных объектах служат измерения концентрации трития в пробах воды, взятых из различных глубин в северо-восточной Атлантике, выполненные Б. И. Жилатти и И. З. Кульп. Они показывают, что до глубины 100 метров концентрация трития незначительно уменьшается. Затем уменьшение становится более заметным. Так, на глубине около 2000 метров концентрация трития примерно в 4 раза меньше, чем у поверхности.

Канадцы Р. М. Броун и У. Ф. Гриммит, изучая тритий в водных бассейнах, нашли, что у поверхности концентрация его равняется 10,8 единицы трития, а на глубине 156 метров—

всего лишь 4,6 единицы. Как видим, несмотря на перемешивание, которое в больших бассейнах происходит довольно интенсивно до глубины 100—200 метров, концентрация трития на глубине 156 метров убывает более чем в 2 раза.

В воде трития относительно мало. В естественных условиях на 10^{18} молекул воды (это — колоссальное число с 18 нулями!) приходится всего лишь несколько таких молекул, в которых один из атомов водорода замещен атомом трития. Поэтому в качестве единицы измерения содержания трития принята такая величина, когда на 10^{18} молекул обыкновенной воды приходится один атом трития. Следовательно, 5 единиц трития обозначают, что на 10^{18} молекул воды приходится 5 молекул, содержащих по одному атому трития, и т. д.

Сравним концентрацию трития, измеренную в воде реки Миссисипи и в дожде, выпавшем в Чикаго.

Чикаго, 1952—1953 годы, осадки — 15 единиц трития; река Миссисипи, 1953 год, вода — 5 единиц трития.

Итак, дождь, приносящий влагу из высоких слоев атмосферы, более радиоактивен (благодаря содержанию трития), чем речная вода. Это показывает, что тритий возникает в высокой атмосфере или за ее пределами, откуда и приходит на Землю. Приведенные данные относятся к 1952 и началу 1953 года, т. е. к периоду, когда атмосфера еще не загрязнялась тритием, попадавшим в нее в больших количествах при испытании термоядерных бомб.

С 1953 по 1958 год в США была выполнена большая программа по исследованию изотопа углерода C^{14} и трития в атмосфере. Баллоны для сбора проб, изготовленные из нерастягивающегося материала, поднимались на высоту от 15 до 30 километров. В систему сбора входили также собирательный баллон, экспериментальный сосуд и контрольный узел. Когда баллон достигал заданной высоты подъема и начинал перемещаться на одном определенном уровне, производился сбор проб. После того как сбор заканчивался, открывался специальный вентиль и часть гелия из оболочки выпускалась, после чего баллон начинал снижаться. Под баллоном был подвешен парашют, благодаря чему удавалось добиться постоянной скорости опускания и сохранить устройство в случае разрыва оболочки. Собирающий баллон был устроен из того же материала, что и подъемная оболочка. Для сбора проб применялись две оболочки: большая, при сборе на высоте более 20 километров, диаметром 144 метра, и малая — для сбора на меньших высотах, диаметром 10,5 метра. Эти оболочки заполнялись с помощью вентилятора типа центрифуги. Во время спуска пробы воздуха из больших оболочек перегонялись в экранированный контейнер объемом около 40 кубических метров. Такая конструкция предохраняла баллон от возможных повреждений при ударе о землю. Источник энер-

гии и управление баллоном было сосредоточено в контрольном узле. Баллоны закрывались и открывались автоматически. Сбор проб (не менее 50—60 кубических метров воздуха) продолжался от $^1/_2$ до $1^1/_2$ часов.

Специальная поисковая команда с помощью радиоприемного устройства, принимавшего сигналы, посылаемые баллоном, следила за его полетом. На автомашинах члены команды направлялись к месту приземления баллона и с помощью компрессора перекачивали собранные образцы в цилиндр высокого давления, который доставлялся в лабораторию для исследований.

В то время когда производились эти измерения, было известно, что в атмосферу попало много H^3 и C^{14} искусственного происхождения, однако они исключались при расчетах. Опыты показали, что в стратосфере трития и изотопа углерода значительно больше (на несколько порядков), чем в нижних слоях атмосферы. Отсюда можно было сделать заключение, что эти изотопы возникают в атмосфере или приходят к нам из космоса. Поскольку максимальные концентрации трития и C^{14} наблюдались в высоких слоях атмосферы, ученые высказали предположение, что именно там и происходит их рождение.

ГЕОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ

Земной шар окружен магнитным полем. Это значит, что в любой точке пространства в окрестностях Земли действуют магнитные силы, заставляющие помещенную туда магнитную стрелку устанавливаться определенным образом. Магнитное поле можно охарактеризовать магнитными силовыми линиями, которые указывают на направление действия магнитных сил. Магнитные силовые линии, окружающие Землю, исходят из двух точек: северного и южного магнитных полюсов.

Магнитные полюсы не совпадают с географическими. Так, северный магнитный полюс имеет следующие географические координаты — 71° северной широты и 96° западной долготы. Поэтому не совмещаются и географический экватор с магнитным. Интересно, что исследования советских космических ракет не обнаружили заметного магнитного поля вблизи Луны. Очень слабым оказалось также магнитное поле вблизи Венеры. Поэтому сейчас выдвигается гипотеза о наличии магнитных полей только возле космических тел, быстро вращающихся около своей оси (время обращения Луны около 27 дней, а Венеры, по предварительным данным,— около 10 дней). Кроме географических координат — широты и долготы, в обиход науки твердо вошли и магнитные координаты: магнитная долгота и широта, отсчитываемые от магнитного экватора. Магнитное поле играет весьма существенную роль в жизни Зем-

ли, в частности, оно влияет на рождение радиоактивных изотопов в атмосфере.

Содержание изотопов в воздухе и в осадках резко колеблется, особенно в период испытаний ядерного и термоядерного оружия. Несмотря на это, проведение опытов в наиболее благоприятное для этого время и правильная оценка результатов показывают некоторую зависимость содержания трития или C^{14} от географической (вернее, магнитной) широты места. Это подтверждают измерения количества трития на различных широтах, проведенные в 1951—1953 годах, когда атмосфера практически еще не была загрязнена тритием, введенным при термоядерных взрывах. Мы располагаем средними значениями концентрации трития в осадках за 1951—1953 годы, собранных в Канаде (Оттава) и США (Чикаго). Чикаго расположен примерно на 500 километров южнее Оттавы. Концентрация трития в Оттаве 26,9, в Чикаго — 15 единиц.

Более полные данные имеются о концентрации трития в поверхностных водах океанов. Правда, там картина чисто широтного эффекта осложняется переносом трития, выпавшего с дождем, течением океана, а также искажается вертикальным перемешиванием воды и т. п. Тем не менее и здесь, хотя не очень четко, выявляется географический эффект распределения трития по широтам.

В табл. 2 помещены данные измерений концентрации трития на различных широтах вдалеке от материка.

Таблица 2

Концентрация трития в поверхностных водах океанов вдали от континентов (1954 г.)

Место взятия пробы	Географические координаты		Концентрация в единицах трития
	северная широта	западная долгота	
Арктика	74°	91°	4,19
Атлантический океан	50°	31°	3,54
	47°	47°	3,60
	19°30′	64°	2,97

Таблица показывает, что концентрация трития по мере приближения к экватору уменьшается. Та же картина наблюдается при исследовании отношения концентрации радиоактивного изотопа углерода к обыкновенному наиболее распространенному в природе углероду C^{14}/C^{12}. Это отношение можно изучить в кольцах деревьев, которые образовались еще до начала испытания атомного оружия, т. е. пока в атмосфере были такие количества C^{14}, которые отражали естественное распределение его в природе. Проведенные измерения показа-

ли рост отношения концентраций C^{14}/C^{12} по мере продвижения к полюсу.

Здесь следует оговориться, что измерения у земной поверхности не обязательно должны отражать картину интенсивности рождения элемента в высокой атмосфере. Прежде чем попасть в нижние слои, атомы радиоактивных веществ, родившихся в высокой атмосфере, могут перемешиваться и передвигаться с потоками воздуха. В результате картина образования изотопа может быть искажена характером распределения его у земной поверхности.

В марте — июле 1961 года на судне «Михаил Ломоносов» изучалась концентрация изотопа Be^7 в нижних слоях атмосферы. Корабль вышел из Одессы и через Средиземное море вошел в Атлантический океан. Он достиг 30° южной широты, а затем вернулся в Калининград, пройдя путь от 30° южной широты до 54° северной широты. Картина распределения Be^7 в приземном воздухе представлена на рис. 1.

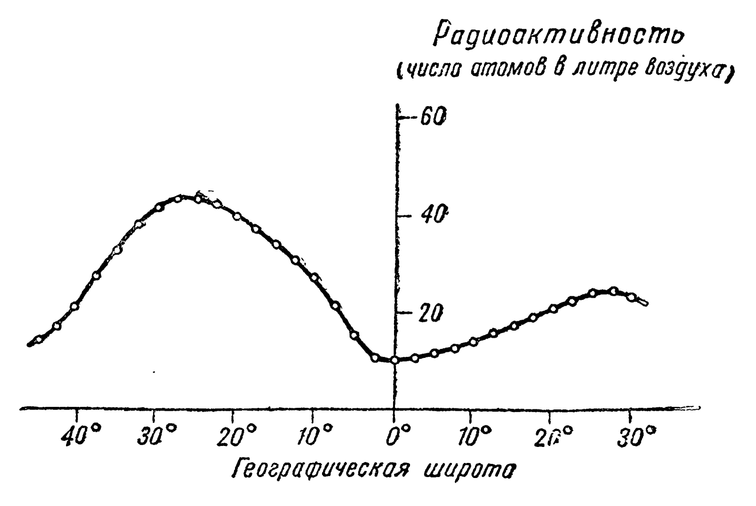


Рис. 1. Распределение концентрации Be^7 по широте в приземном слое.

В зоне южнее экватора заметен минимум бериллия, к северу и югу от него концентрация бериллия в воздухе растет, достигая максимума на широтах около 30°, затем опять падает. Это последнее явление, видимо, отражает особенности перемешивания высоких слоев атмосферы — стратосферы с нижним структурным слоем атмосферы — тропосферой.

Несмотря на некоторые искажения опытов, все же можно заключить, что существует зависимость образования и концентрации радиоактивных веществ в высоких слоях атмосферы от геомагнитной широты. Концентрация изотопов, видимо,

на высоте растет по направлению к магнитным полюсам Земли, уменьшаясь у экватора. Если предположить, что изотопы, приведенные в табл. 1, образуются в атмосфере, то распределение их может создать представление о причинах, вызывающих их образование. Примерно так же распределена по широтам интенсивность космических лучей, и, следовательно, естественно предположить, что эти изотопы образуются в результате бомбардировки космическими частицами ядер элементов, составляющих атмосферный воздух.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ

Еще в начале нашего столетия было установлено, что в атмосферу непрерывно проникают очень жесткие лучи, способные проходить через толщу воды в десятки и сотни метров.

Эти лучи приходят из космоса, и поэтому их назвали космическими. С. Н. Вернов экспериментально показал, что основной частицей, приходящей к нам из мирового пространства, является протон. Позже выяснилось, что в космических лучах могут быть также ядра некоторых легких элементов. Проникая в атмосферу, эти частицы взаимодействуют с ее веществом.

Посылая космические корабли в глубины мирового пространства, ученые убеждаются, что оно не пустое. Где бы то ни было, близко или далеко от больших сгустков материи типа звезд, планет или даже галактик,— всюду существует вещество. Каждый кубический сантиметр пространства пронизывают быстро летящие частицы света — фотоны; в нем находится несколько десятков и больше движущихся электронов, в меньших количествах присутствуют протоны и ядра других легких атомов.

Космическое пространство заполнено не только веществом — в нем действуют и поля: тяготения, электростатическое, электромагнитное. Протяженность физических полей безгранична, поэтому любая частица, например протон, в космическом пространстве подвержена действию электромагнитных и гравитационных сил. При благоприятных условиях частицы, странствуя в безбрежных пространствах космоса, подгоняемые действием сил физических полей, могут разгоняться до колоссальных скоростей. Встречая на своем пути Землю, частицы обрушиваются на ее атмосферу и вызывают ядерные реакции.

Другим источником быстрых космических частиц могут быть звезды. В раскаленных до многих миллионов градусов недрах звезд ядра вещества могут приобрести колоссальную энергию и быть выброшенными в мировое пространство. Эти маленькие снаряды летят с гигантской скоростью. Они могут проникать через вещество и, взаимодействуя с его атомами,

порождать множество вторичных частиц: мезонов, фотонов, электронов, позитронов и других. Эти быстролетящие частицы, в свою очередь способны вызывать ядерные реакции и «производить на свет» новые вещества.

РОЖДЕНИЕ ИЗОТОПОВ В АТМОСФЕРЕ

Атмосфера представляет собой скопление большого числа молекул многих газов.

Если бы мы обладали чудесной способностью проникнуть взглядом в мир молекул и увидеть, что там происходит, то нам представилась бы необыкновенная картина. Мы увидели бы хаос движущихся молекул. Вот попарно летят молекулы кислорода (O_2); они сталкиваются с другими молекулами, отскакивают от них и стремительно несутся назад, вновь сталкиваются и опять летят, не сбавляя скорости. Их движения хаотичны, беспорядочны, направление движения и скорость непрерывно меняются, молекулы вычерчивают невероятные фантастические линии. В таком же состоянии находятся все молекулы, составляющие воздух: молекулы азота, водяного пара H_2O, водорода H_2 и другие. Особенно стремительно, обгоняя прочие молекулы, летят, будто соревнуясь между собой, молекулы водорода; они меньше других, поэтому, сталкиваясь с более крупными молекулами, всегда оказываются побежденными — отскакивают. Относительно медленно проплывает любитель одиночества — атом аргона, он не объединяется с другими, чтобы образовать молекулу. В этот хаос непрерывного движения иногда врываются космические снаряды — частицы космических лучей. Их скорость колоссальна даже в мире быстро движущихся молекул. Молекулы воздуха в нормальных условиях движутся со скоростями в 0,5—1 километр в секунду, а скорость космических частиц достигает величин, близких к скорости света (300 000 километров в секунду). И вот иногда такой снаряд попадает в ядро атома, вызывая в нем ядерную реакцию. В результате из ядра выле-

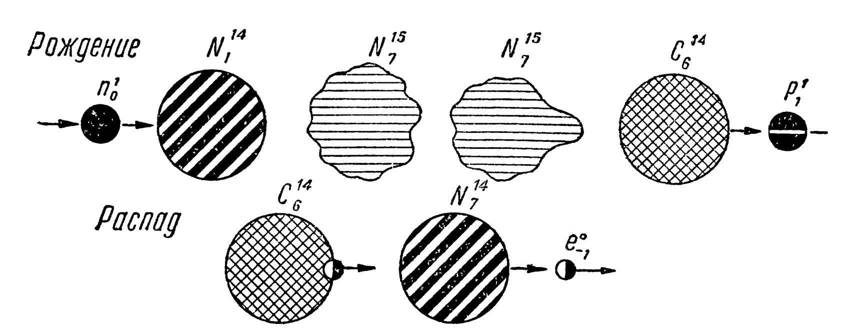


Рис. 2. Образование C^{14} в результате ядерной реакции.

тает частица, происходит превращение одного вещества в другое.

Ядерные реакции, происходящие при бомбардировке космическими частицами, хорошо изучены. Акты рождения новых веществ могут происходить под влиянием как первичных космических частиц, пришедших из глубин мирового пространства, так и вторичных, рожденных в высоких слоях атмосферы. Образование C^{14} можно представить себе так: нейтрон, родившийся от первичной космической частицы, попадает в ядро азота (рис. 2), которое, захватывая его, становится неустойчивым и выбрасывает протон, уносящий один положительный заряд и превращающий азот в углерод.

$$N^{14}{}_7 + n^1{}_0 \rightarrow N^{15}{}_7 \rightarrow C^{14}{}_6 + P^1{}_1$$

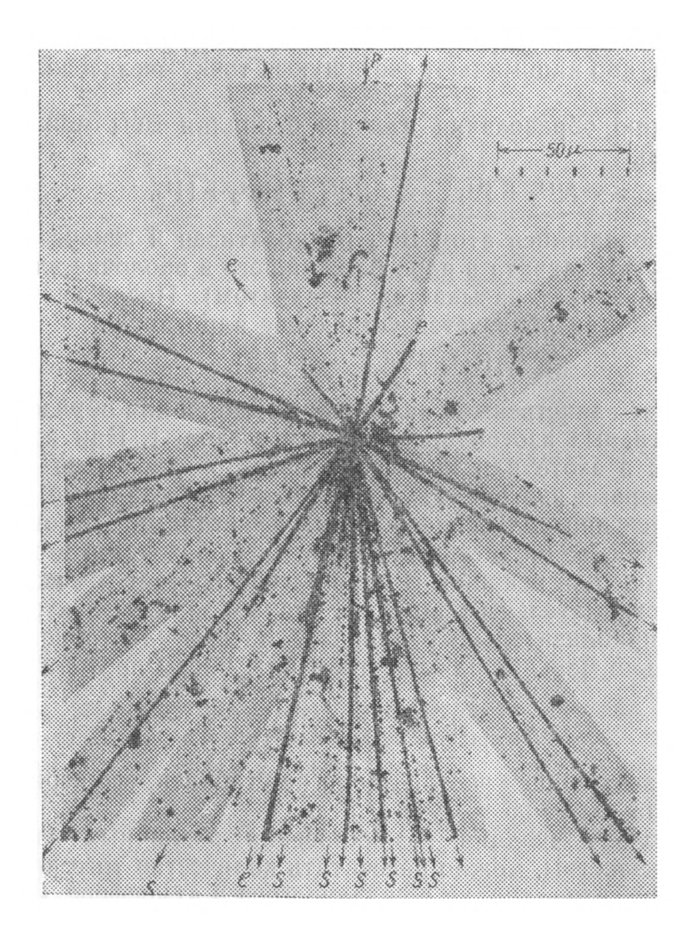


Рис. 3. Звезда — фотоснимок ядерной реакции в серебре. Толстые следы — ядра новых элементов; пунктирные следы — электроны и позитроны.

Радиоактивный изотоп углерода распадается с излучением электрона, опять превращаясь в азот:

$$C^{14}_6 \rightarrow N^{14}_7 + e^0_{-1}.$$

Атом радиоактивного изотопа бериллия Be^7_4 возникает иначе. Первичная частица космических лучей протон, обладающий большой энергией, проникает в ядро азота, в результате чего образуются три осколка: две α-частицы (ядра гелия) и ядро изотопа Be^7. Подобную ядерную реакцию можно сфотографировать на специальной ядерной эмульсии или пользуясь камерой Вильсона, так как первичная частица и три разлетающихся осколка оставляют в эмульсии скрытое изображение, которое после проявления становится явным. На рис. 3 приведена фотография ядерной реакции в серебре с образованием многих новых ядер. Такие фотографии называются звездами, ибо напоминают светящуюся точку звезды со следами лучей.

Реакцию образования изотопа бериллия Be^7_4 можно записать так:

$$N^{14}_7 + P^1_1 \rightarrow Be^7_4 + He^4_2 + H^4_2.$$

Образовавшийся атом Be^7_4 радиоактивен и вскоре распадается путем захвата в ядро ближайшего в оболочке электрона (такой захват называется K-захватом). После излучения кванта энергии образуется устойчивое ядро лития:

$$Be^7_4 + e^0_{-1} \rightarrow Li^7_3.$$

Азот не единственный исходный материал для образования радиоактивных изотопов, указанных в табл. 1. При ядерных реакциях в азоте или кислороде могут образоваться только четыре первых изотопа: H^3, Be^7, Be^{10} и C^{14}. Остальные восемь рождаются при облучении быстрыми частицами атомов аргона Ar^{40}. Так, радиоактивный изотоп Cl^{39} образуется в результате следующей реакции. В ядро аргона влетает μ-мезон (частица с отрицательным зарядом, равным заряду электрона, и массой, приблизительно равной 207 массам электронов, т. е. значительно меньше, примерно в 9 раз, массы протона и нейтрона):

$$Ar^{40}_{18} + \mu^- \rightarrow Cl^{39}_{17} + n^1_0.$$

Образовавшийся изотоп хлора не стабилен, его период полураспада равен 55 минутам.

Поскольку реакции возникновения различных изотопов хорошо известны, можно рассчитать количество того или иного изотопа, ежесекундно рождающегося в атмосфере. Обычно принято рассчитывать количество атомов изотопов, образующихся каждую секунду в столбе атмосферы, расположенном над одним квадратным сантиметром земной поверхности.

Чем интенсивнее космическое излучение и выше в атмосфере исследуемый участок, тем с большей вероятностью можно ожидать акт рождения нового атома. Новые атомы возникают при взаимодействии космических лучей с воздухом, следовательно, чем больше концентрация молекул воздуха, тем больше должно возникнуть новых изотопов. Концентрация молекул больше в слоях, близких к Земле. Поэтому возникновение новых элементов наиболее интенсивно происходит в таких слоях, где еще не очень ослабло космическое излучение, но уже имеется достаточно много исходного материала — молекул воздуха. Эти слои обычно относятся к стра-

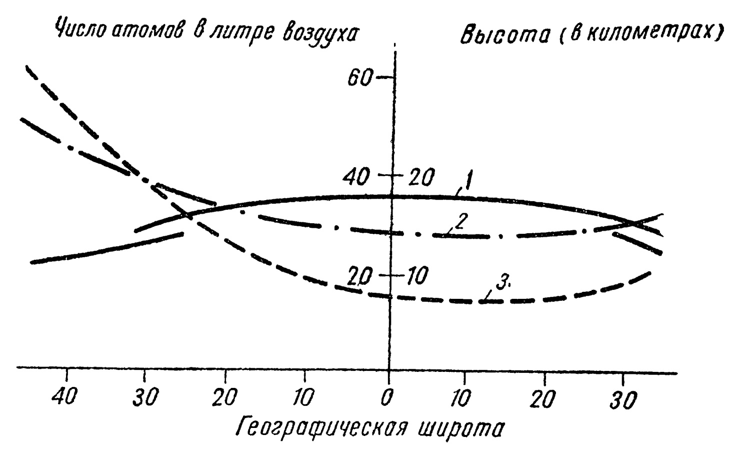


Рис. 4. Разрез атмосферы с линией максимальной концентрации бериллия-7:
1 — тропосфера; *2* — кривая максимальной концентрации; *3* — кривая теоретической концентрации, характеризующая образование атомов Be^7 в атмосфере.

тосфере и располагаются на различных высотах. Наиболее благоприятный слой для рождения различных изотопов может быть теоретически рассчитан или определен экспериментально. Зона максимальной концентрации изотопа не обязательно должна совпадать с зоной максимального количества рождающихся атомов, ибо первая зависит как от числа актов рождения, так и от движения воздушных масс и их перемешивания. Интенсивность космических лучей на разных широтах известна из данных эксперимента, поэтому представляется возможность рассчитать рождение изотопа на разных широтах и построить соответствующую зависимость его концентрации по широте.

На рис. 4 представлены расчетные данные об интенсивности рождения изотопа Be^7 в атмосфере и о высоте зоны его

максимальной концентрации. Мы видим, что рождение бериллия зависит от магнитной широты, не совпадающей с географической. Минимум рождающихся атомов находится примерно в районе 10° южной широты. Чем объясняется такое распределение? Магнитные силовые линии, окружающие земной шар, образуют своеобразный барьер для заряженных космических частиц. Эти частицы, приближаясь к Земле, отклоняются магнитным полем к полюсам, винтообразно скользя вдоль силовых линий (рис. 5).

Рис. 5. Заряженные частицы, приближаясь к Земле, скользят вдоль линий магнитного поля.

Проникнуть в нижнюю атмосферу в низких широтах могут лишь заряженные частицы с очень высокими энергиями. Таким образом, интенсивность космических лучей в полярных районах должна быть больше, а в экваториальных — меньше.

По современным оценкам, можно считать, что в средних широтах в одну секунду в столбе воздуха с основанием в один квадратный сантиметр рождается в среднем 0,4 атома трития, около 2,4 атома изотопа углерода, около 0,04 атома изотопа бериллия и т. д.

Зная количество ежесекундно рождающихся атомов, можно подсчитать, сколько их находится на земном шаре при условии радиоактивного равновесия. Такие подсчеты показывают, что на Земле должно находиться около 80 тонн изотопа углерода-14, около 12 килограммов трития и всего лишь около 35 граммов изотопа бериллия-7.

Возникновение новых изотопов происходит не только под воздействием космических лучей, но и при испытаниях ядерного и термоядерного оружия. При взрыве атомной и термоядерной бомбы выделяется большое количество нейтронов с высокими энергиями. При воздействии этих нейтронов на вещество атмосферы рождаются много стабильных и радиоактивных изотопов, в том числе и те, о которых говорилось выше. В периоды испытаний ядерного оружия атмосфера была сильно загрязнена и изучение изотопов, рождаемых космическими лучами, оказывалось затруднительным.

Зарядом атомной бомбы обычно служит уран-235 или плутоний-239, которые делятся под влиянием нейтронов. Осколки деления обычно радиоактивны.

При делении урана-235 образуется около 100 различных изотопов. При испытаниях на Земле или в атмосфере все эти изотопы попадают в атмосферу. Многие из них вскоре распадаются, но некоторые способны долго находиться в атмосфе-

ре и вызывать ее дополнительную радиоактивность. Интересно, что из этих 100 изотопов через час наибольший вклад в радиоактивность атмосферы вносят 29 изотопов, через 2 дня — 20, через год — 12, а через 100 лет только 3 элемента. Таким образом, возникшие в атмосфере изотопы способны длительное время существовать в ее пределах. Правда, изотопы удаляются из атмосферы не только при радиоактивном распаде, но и другими путями. Большинство из возникающих при ядерном взрыве изотопов — это атомы твердых веществ, поэтому они могут оседать на большие пылинки и с ними вместе попадать на Землю или вымываться из атмосферы дождем и снегом.

При искусственно вызванном делении урана или плутония в атмосфере возникают изотопы ксенона Xe^{133} и Xe^{135}. Они за несколько месяцев полностью распадаются. Дольше живет изотоп криптона Kr^{85}, его можно обнаружить спустя десятки лет. В виде паров в атмосфере находятся и радиоактивные изотопы йода, их можно находить в атмосфере в течение некоторого времени.

Наиболее длинным периодом полураспада обладают продукты деления стронций-90 и цезий-137. Поэтому эти продукты, если они не осядут на почву, будут существовать в атмосфере несколько сот лет. Стронций-90 при распаде дает короткоживущий радиоактивный изотоп иттрий-90, который затем также быстро распадается. Но поскольку он образуется из стронция, его можно наблюдать до тех пор, пока из атмосферы полностью не исчезнет весь стронций. По той же причине долго будет существовать и дочерний продукт цезия изотоп барий-137. Таким образом, ядерные испытания повысили содержание радиоактивных изотопов в атмосфере.

СОСТАВ И ЭВОЛЮЦИЯ АТМОСФЕРЫ

Открытие и исследование рождения радиоактивных изотопов в атмосфере меняет наше представление о ее составе.

В настоящее время уже исследованы некоторые радиоактивные изотопы, рождающиеся в атмосфере, однако это только начало.

Если учесть, что первичные космические лучи порождают в атмосфере множество частиц высоких энергий — нейтронов, мезонов и других, способных вызывать ядерные реакции, то станет ясным, что взаимодействие их с атомами газов, составляющих атмосферу, может приводить к возникновению множества стабильных и радиоактивных изотопов. Дальнейшие исследования, несомненно, приведут к открытию таких изотопов, которые пока еще не вошли в табл. 1.

Если допустить, что интенсивность космического излучения в далекие прошлые эпохи могла меняться, например, из-за изменения интенсивности магнитного поля Земли, то возникает вопрос: как это изменение отразилось на составе атмосферного воздуха? На этот вопрос также дадут ответ дальнейшие исследования.

Таким образом, исследуя рождение изотопов в атмосфере, по-видимому, можно делать какие-то заключения об эволюции состава атмосферного воздуха.

Уже первые результаты этих исследований меняют наш взгляд на атмосферу. Она оказывается средой, где происходит интенсивное изменение состава вещества. Атмосфера живет сложной жизнью. В ней непрерывно возникают и распадаются всевозможные изотопы, и их подвижное равновесие образует состав атмосферы.

В результате распада радиоактивных изотопов, составляющих табл. 1, образуются стабильные элементы. Некоторые из них представляют атомы твердого вещества, например Li^7, B^{10}, S^{32}, S^{33}, K^{41}.

Эти вещества, образовавшиеся в атмосфере, могут оседать на пылинках, каплях дождя или кристаллах снега и вместе с ними падать на Землю. Не этим ли объясняется широкое распространение некоторых элементов повсюду в земной коре, но в небольших количествах? На этот вопрос, по-видимому, в недалеком будущем смогут ответить геологи и геохимики.

ПРИМЕНЕНИЕ ИЗОТОПОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В АТМОСФЕРЕ

Датирование по изотопу углерода

Прошли многие века, и время донесло до нас саркофаги с телами фараонов, замурованных в погребальницах и пирамидах. Мы проникаем в них, изучаем обычаи древних, читаем папирусы, погружаемся в мир прошлого. Для того чтобы правильно оценить эпоху древнего Египта, нужно узнать время царствования фараона. Еще недавно у историков и археологов не было достаточно объективного способа точно датировать эпоху. Теперь такая возможность есть.

Если взять кусочек дерева саркофага, в котором покоится мумия фараона, и определить в образце концентрацию радиоактивного углерода и сравнить ее с концентрацией в куске растущего дерева, то легко можно установить возраст саркофага и определить время жизни и царствования фараона. Эпоха фараонов удалена от нас на 5—10 тысячелетий, а такое время поддается точному датированию углеродным методом.

Каждое радиоактивное вещество обладает только ему одному присущей величиной — периодом полураспада. Это

время, в течение которого любое количество радиоактивного вещества распадается наполовину. Зная эту величину, можно составить таблицу, из которой легко будет определить, какое количество радиоактивного вещества останется в любое время после начала исследования. Эти графики будут отличаться в зависимости от того, для каких изотопов они составлены. Для археологических датировок возраста по древесине необходимо знать, какая радиоактивность была у дерева, когда оно росло. Понятно, что этого определить сейчас нельзя. Однако с достаточным обоснованием можно утверждать, что концентрация C^{14} в воздухе во все времена истории была примерно такой же, как и сейчас. Это дает право концентрацию C^{14} в современном дереве отождествлять с концентрацией этого изотопа в древесине времен фараонов. Зная концентрацию C^{14} в дереве в момент, когда оно было срублено, и определив радиоактивность дерева древней находки, мы обнаруживаем ее уменьшение. Чем больше снизилась эта концентрация, тем больше времени прошло с момента, когда дерево было срублено. Пользуясь несложными формулами, графиками или таблицами, можно довольно точно ответить на вопрос о времени, прошедшем после события, во времена которого росло это дерево, а значит, установить дату и самого события.

Американские физики И. Р. Арнольд и В. Ф. Либби произвели несколько определений возраста дерева изделий древнего Египта. Так, кусок доски (по-видимому, ливанский кедр) от погребального судна египетского фараона Сенусерта III, будучи проанализирован на радиоактивность, дал возможность подсчитать возраст дерева, который оказался равным примерно 3700 лет. Это с достаточной точностью совпадает с датой эпохи царствования фараона, установленной по археологическим находкам. Возраст кипариса из саркофага фараона Снофу в Медуме археологи определяют в 4575 лет. Кусок акации из гробницы фараона Джосера в Саккаре, по данным археологов, имел возраст 4650 лет. Измерения радиоактивности в обоих случаях привели к возрасту 4750 лет, что является неплохим совпадением. Наконец, возраст куска египетского окаменелого деревянного гроба, по радиометрическим определениям, был установлен в 2300 лет, что совпало с определениями археологов, которые на основании изучения стилистических особенностей находки отнесли ее к этому же периоду.

Радиометрическим методом был определен возраст угля из очага стоянки древних камчадалов, обнаруженной при раскопках на глубине 2,7 метра и покрытой несколькими слоями пепла от извержений вулкана Шивелуч. Возраст угля оказался равным 3100 лет. Анализ нескольких образцов угля, найденных при раскопках древнего Хорезма в топке большой обжигательной печи, имел возраст 1800—1900 лет (точность определения ± 180 лет).

В Мамонтовом горизонте, где были найдены кости мамонтов, в районе северного берега Таймырского озера, при раскопках в 1949 году исследователи с помощью радиоактивного метода определили возраст найденной древесины ископаемой ивы в 11 700 лет (точность определения ±300 лет).

Дно океана

В верхней тропосфере и нижней стратосфере на высотах 10—25 километров образуется радиоактивный изотоп Be^{10}. В отличие от Be^{7} период его полураспада велик и близок к 3 миллионам лет. Атомы Be^{10} участвуют в движениях и перемешивании воздуха, достигая высоты облачных слоев, где захватываются облачными каплями. Кроме того, Be^{10} может прилипать к пылинкам и вместе с ними попадать на земную и водную поверхность. Попав в воды океана, атомы Be^{10} под влиянием силы тяжести постепенно достигают дна и откладываются вместе с другими веществами, образуя осадки.

Этот процесс идет непрерывно в течение многих миллионов лет Если взять столбик грунта со дна океана и измерить концентрацию Be^{10} на различных глубинах в грунте, то сведения о его концентрации на любых глубинах позволяют рассчитать время, когда образовался тот или иной слой дна океана.

Допуская, что интенсивность космической радиации не менялась в течение последних двух миллионов лет и зная период полураспада Be^{10} (см. табл. 1), можно рассчитать скорость его осаждения. Она оказалась равной $2{,}35 \cdot 10^{6}$ атомов на один квадратный сантиметр в течение года. Результаты исследования бериллия-10 на дне океанов согласуются с данными о скорости его осаждения. Тем самым подтверждается, что бериллий-10, находящийся на дне океана, действительно атмосферного происхождения.

Расчеты показывают, что на Земле имеется примерно 800 тонн Be^{10}, которые распределены между атмосферой, водными бассейнами, почвой и дном океана, где он находится на сравнительно небольших глубинах.

Перемешивание атмосферы

Атмосфера неспокойна, в ней непрерывно перемещаются, обмениваются местами большие и малые воздушные массы. Эти явления представляют большой интерес для прогнозирования погоды, и изучение их очень трудоемко и подчас невозможно без применения радиоактивных методов. Радиоактивные вещества тем хороши, что могут быть обнаружены в небольших количествах. Поэтому если в какой-либо район воздушной массы ввести радиоактивное вещество, то оно будет вместе с ней перемещаться и служить ее опознавательным

признаком. Такие радиоактивные метки могут быть искусственно созданы человеком; они же образуются в атмосфере благодаря естественным процессам образования изотопов.

Из радиоактивных изотопов, возникающих в атмосфере под действием космических лучей, для изучения движений атмосферы большого масштаба в основном пригодны только такие изотопы, у которых период полураспада сравнительно короткий, например Be^7, P^{32}, P^{37}, S^{35}, Cl^{39}.

Эти изотопы быстро распадаются, поэтому воздушная масса, которая пришла из района, где они возникают более интенсивно, вскоре начинает утрачивать те значения его концентрации, которые характерны для прежнего места, и тем самым появляется возможность определить промежуток времени от момента начала движения воздушной массы.

Изучая содержание Be^7 в воздухе у земной поверхности, необходимо обратить внимание на сезонные изменения его количества. Весной в марте — мае концентрация Be^7 у Земли достигает максимального значения и имеет величину от 1 до 30 атомов в литре. Для объяснения этого явления пришлось допустить, что в весенний период Be^7 особенно активно проникает из стратосферы (где его концентрация значительно больше) в тропосферу, а затем и в ее нижние слои.

Между нижним слоем атмосферы — тропосферой и стратосферой имеется переходной слой, который называют тропопаузой. Тропопауза расположена в полярных областях на высоте 8—10 километров, а у экватора — на высоте 18—20 километров. Она служит своеобразной преградой, препятствующей проникновению воздушных масс в пространство между тропосферой и стратосферой.

Весной благодаря некоторым особенностям перемешивания атмосферы и усиления активности движения в средних широтах тропопауза разрывается, и через зону разрыва происходит обмен воздухом между стратосферой и тропопаузой. Be^7 образуется в основном в нижней и средней стратосфере, а поэтому проникновение вниз через разрыв тропопаузы увеличивает его концентрацию в тропосфере. В процессе оседания атомы Be^7 могут достигать слоя облачности и там прилипать к каплям. Выпадающий при этом дождь приносит в нижние слои атмосферы повышенные концентрации изотопа бериллия.

Располагая сведениями об образовании атомов Be^7 в стратосфере и тропосфере и измеряя его распределение в атмосфере, можно рассчитать, с какой скоростью он удаляется из стратосферы или тропосферы на Землю. Расчеты показывают, что среднее время удаления бериллия-7 из воздуха тропосферы близко к 30—60 суткам.

В последнее время ученые начинают убеждаться в том, что между атмосферами северного и южного полушарий наблю-

дается довольно активный процесс перемешивания воздушных масс. Для его изучения можно, например, воспользоваться радиоактивным изотопом углерода, рождающегося в атмосфере. Легко соединяясь с кислородом, этот изотоп образует молекулу CO_2. Количество атомов, образующихся в воздухе ежесекундно в результате действия космических лучей, известно по данным эксперимента (его можно также подсчитать теоретически). Следовательно, нам известна и концентрация радиоактивного изотопа C^{14} в воздухе на различных географических широтах. Если теперь, например, в северном полушарии искусственно ввести какое-то количество C^{14}, то начнется движение избытка радиоактивного углерода из северного полушария в южное до установления равновесия.

Такие условия неравномерного распределения радиоактивного углерода оказались в конце 1958 года после проведенных в течение ряда лет испытаний термоядерных бомб. В конце 1958 года испытания были прерваны, и можно было изучить экспериментально, как в обоих полушариях происходит выравнивание концентрации C^{14}. За начало времени введения в атмосферу радиоуглерода можно принять 1955 год. Учитывая экспериментальные данные о росте концентрации радиоактивного углерода по измерениям у Земли, начиная с 1955 года в северном и южном полушариях, оказалось возможным рассчитать некую величину, называемую постоянной перемешивания через стратосферу или тропосферу. Эта величина, в свою очередь, позволила установить время, в течение которого различие между концентрациями C^{14} в полушариях становится незначительным.

Оказалось, что время обмена изотопом между полушариями как в стратосфере, так и в тропосфере примерно одинаково и равно приблизительно 1,5 лет. Эта цифра указывает, что между атмосферами полушарий существует некий невидимый барьер, мешающий перемешиванию воздушных масс севера и юга. Однако этот барьер преодолевается, и для этого необходимо затратить более года времени. В то же время движение и перемешивание воздушных масс по широте происходит значительно быстрее. Так, следя за движениями пылевых радиоактивных облаков, возникших в какой-либо точке земного шара в пределах тропосферы, ученые установили, что оно длительное время остается примерно в тех же широтах и, двигаясь вдоль этих широт за время, обычно меньшее месяца, успевает обойти весь земной шар.

Таким образом, изучая жизнь и поведение изотопов, возникающих в атмосфере, мы глубже познаем саму атмосферу и законы ее движения, тем самым приближаясь к решению основной проблемы метеорологии — научиться точно прогнозировать погоду и в будущем найти пути управления метеорологическими процессами.

4 коп. **Индекс 72929**